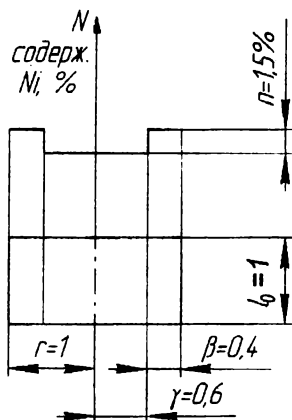


К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ЛИКВАЦИИ НИКЕЛЯ НА ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ЖЕЛЕЗОНИКЕЛЕВОГО ИНВАРА

Минуло более ста лет после изобретения Ш.Э.Гийомом инвара, сплава железо – 36% никеля, но до сих пор в его природе остается еще много загадок. Одной из них является понимание механизма влияния ликвации никеля на тепловое расширение литого инвара. Установлено, что инварные сплавы затвердевают с образованием ячеистой структуры, в которой наблюдается ликвация никеля к границам ячеек [1]. Ячеистая структура в образцах диаметром 5-7 мм не наблюдалась лишь при бестигельной зонной плавке со скоростью 0,55 мм/мин, т.е. при большом температурном градиенте и низкой скорости затвердевания. Создать такие условия при затвердевании слитков и фасонных отливок невозможно. Это означает, что во всех применяемых на практике инварных сплавах имеет место ликвация никеля. Будем называть такие инварные сплавы обычными, а сплавы, в которых ликвация никеля отсутствует – гомогенными.



Структурный элемент инвара
и принятое распределение Ni в нем.

Для понимания влияния ликвации никеля на тепловое расширение инваров были разработаны математические модели, основанные на предположениях, что, по сравнению с обычными инварами, экстремум температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) гомогенного инвара находится при меньшем содержании никеля и его абсолютная величина меньше, чем у обычного инвара. Кроме этого предполагалось, что итоговый ТКЛР обычного инвара подчиняется правилу аддитивности ТКЛР его структурных составляющих с разным содержанием никеля. Однако эксперимент по измерению ТКЛР обычного и гомогенного инваров с одинаковым содержанием никеля (35,84%) и примесей поставил некоторые из этих предположений под сомнение. Оказа-

лось, что после всех вариантов термической обработки (закалка, закалка с отпуском, нормализация и отжиг) ТКЛР обычного инвара был меньше, чем гомогенного, на 21-23% в трех первых вариантах термообработки и на 14,4% после отжига [2]. Поскольку структура обычного инвара состоит из участков с разным содержанием никеля, имеющих, следовательно, разные ТКЛР, то, даже после отжига, в нем неизбежны остаточные напряжения, которые, как известно [3], снижают ТКЛР. В связи с этим представляло интерес попытаться разработать математическую модель, учитывающую наличие напряжений в структуре обычного инвара, что и явилось целью настоящей работы.

В рамках первого приближения в качестве структурного элемента обычного инвара выбран цилиндр, во внешней части которого содержание никеля превышает таковое в его центральной части на 1,5% см. рис.

Введем следующие условные обозначения:

P_1, P_2 – усилие в наружной и внутренней части структурного элемента соответственно;

σ_1, σ_2 – напряжение в наружной и внутренней части соответственно;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительная деформация этих частей соответственно;

E_1, E_2 – модуль упругости материалов наружной и внутренней части соответственно;

S_1, S_2 – площадь наружной и внутренней части торца структурного элемента;

ℓ_0 – начальная длина структурного элемента соответственно;

ℓ_1, ℓ_2 – длина наружной и внутренней частей в свободном состоянии после изменения температуры соответственно;

Δt – величина изменения температуры;

ℓ_{cp} – средняя длина структурного элемента после изменения температуры;

α_1, α_2 – ТКЛР материалов наружной и внутренней части соответственно;

α – ТКЛР структурного элемента.

Будем учитывать температурное изменение размера структурного элемента только в осевом направлении. Предположим также, что содержание никеля в частях структурного элемента находится по одну сторону от экстремума ТКЛР, т.е. $\alpha_1 > \alpha_2$.

В качестве первого шага рассмотрим гипотетический случай, когда в исходном состоянии при комнатной температуре напряжения в частях структурного элемента отсутствуют. В этом случае после нагрева наружная часть окажется сжатой, а внутренняя – растянутой. Поскольку структурный элемент находится в равновесии, то

$$P_1 = P_2, \quad (1)$$

$$\text{или} \quad \sigma_1 \cdot S_1 = \sigma_2 \cdot S_2 \quad (2)$$

С учетом обобщенного закона Гука уравнение (2) примет вид

$$E_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot S_1 = E_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot S_2 \quad (3)$$

Величины ε_1 и ε_2 составят

$$\varepsilon_1 = \frac{|\ell_{\varphi} - \ell_1|}{\ell_1}; \quad \varepsilon_2 = \frac{|\ell_{\varphi} - \ell_2|}{\ell_2}; \quad (4)$$

$$a \quad S_1 = \pi(r^2 - \gamma^2); \quad S_2 = \pi\gamma^2 \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в выражение (3), получим

$$E_1 \cdot \pi(r^2 - \gamma^2) \frac{|\ell_{\varphi} - \ell_1|}{\ell_1} = E_2 \cdot \pi\gamma^2 \frac{|\ell_{\varphi} - \ell_2|}{\ell_2}. \quad (6)$$

Раскрыв модули и учитывая, что $\ell_1 = \ell_0(1 + \alpha_1\Delta t)$, а $\ell_2 = \ell_0(1 + \alpha_2\Delta t)$ решим уравнение (6) относительно ℓ_{φ} :

$$\ell_{\varphi} = \frac{\ell_0(1 + \alpha_1\Delta t)(1 + \alpha_2\Delta t)[E_1 \cdot (r^2 - \gamma^2) + E_2\gamma^2]}{(1 + \alpha_2\Delta t) \cdot E_1(r^2 - \gamma^2) + (1 + \alpha_1\Delta t) \cdot E_2 \cdot \gamma^2} \quad (7)$$

Определив ℓ_{φ} , находим

$$\alpha = \frac{\ell_{\varphi} - \ell_0}{\ell_0 \cdot \Delta t}. \quad (8)$$

В рамках сделанных допущений уравнения (7) и (8) позволяют найти ТКЛР инвара с учетом напряжений в его структуре. Однако было бы преждевременно пытаться использовать эти уравнения для численных расчетов. Дело в том, что входящие в них значения α_1 , α_2 , E_1 и E_2 относятся к гомогенным инварам и в настоящее время еще не определены. Это обстоятельство свидетельствует об исключительной важности экспериментального их определения на образцах гомогенных инваров с разным содержанием никеля. Кроме этого предстоит уточнить изложенную модель, приблизив ее к реальной картине распределения никеля в ячеистой структуре и начальному состоянию структурного элемента, в котором между его частями уже есть напряжения, возникающие при формировании структуры инвара.

Таковы, в общих чертах, направления дальнейших исследований, необходимых для понимания механизма влияния ликвации никеля на тепловое расширение инвара.

1. Сидоренко Р.А., Рабинович С.В., Харчук М.Д. Изучение особенностей кристаллизации сплава 32НЖД. //Известия вузов. Черная металлургия. 1978. № 10 С. 144-147.

2. Сидоренко Р.А., Малахов К.А., Головнина Л.И. Тепловое расширение обычного и гомогенного инвара в литой структуре. // Совершенствование литейных процессов: Материалы международной конференции литейщиков. 18-19 марта 1999 г. / Екатеринбург: УГТУ, 1999, с. 186-191.

3. Прецизионные сплавы: Справочник. /Под ред. Б.В.Молотилова. 2-ое изд., перераб. и дополн. М.: Металлургия, 1983. 439 с.